



DIDÁCTICA DE LA QUÍMICA

El diagrama de flujo como semáforo de seguridad ecológica de los experimentos de laboratorio



Yolanda Marina Vargas-Rodríguez^{a,*}, Adolfo Obaya Valdivia^a,
Suemi Lima Vargas^b, Anabel Hernández Escamilla^a,
René Miranda Ruvalcaba^a y Guadalupe Iveth Vargas Rodríguez^a

^a Departamento de Ciencias Químicas, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México, Cuautitlán Izcalli, Estado de México, México

^b Universidad Centro de Diseño Cine y Televisión, México, D.F., México

Recibido el 3 de diciembre de 2014; aceptado el 24 de abril de 2015

Disponible en Internet el 18 de octubre de 2015

PALABRAS CLAVE

Diagrama de flujo;
Química verde;
Experimentos de
laboratorio

Resumen Se presenta una métrica integral que permite evaluar el acercamiento verde de un experimento dado, lo anterior a partir de su respectivo diagrama de flujo; en este se integran tanto el tratamiento y la disposición de los residuos, además de considerar los riesgos para la salud, el ambiente y la seguridad utilizando los pictogramas y rombos de seguridad de reactivos, sustancias auxiliares, productos y residuos. También se muestra una carta de 13 colores (del rojo al verde) en los sistemas RGB y CMYK que indican el número de principios de la química verde que cumple cada experimento, y que se utilizan como color de fondo en los componentes del diagrama.

Derechos Reservados © 2015 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0.

KEYWORDS

Flowchart;
Green chemistry;
Laboratory
experiments

The flowchart as a traffic light on ecological security of laboratory experiments

Abstract In this paper a comprehensive metric that allows the assess to the greenness of the experiments from the flowchart is presented. The corresponding diagram integrates the treatment and disposal of waste, in addition are considered risks to health, the environment and security using pictograms and safety of reactive rhombuses, auxiliary substances, products and wastes. A letter from 13 colors (from red to green) is also shown in RGB and CMYK systems indicating the number of principles of green chemistry that meets each experiment, and which are used as background color in the diagram components.

All Rights Reserved © 2015 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. This is an open access item distributed under the Creative Commons CC License BY-NC-ND 4.0.

* Autor para correspondencia.

Correos electrónicos: ym_vargas@yahoo.com, ymvargas@unam.mx (Y.M. Vargas-Rodríguez).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.eq.2015.04.013>

0187-893X/Derechos Reservados © 2015 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0.

Introducción

A partir de la publicación de los 12 principios de la química verde (Anastas y Warner, 1998) se ha discutido la importancia de incorporar la química verde en los planes y programas de estudio, especialmente en los niveles de bachillerato y licenciatura (Hjerensen, Boese y Schutt, 2000; Kirchhoff, 2001, 2005, 2007, 2009; Anastas y Kirchhoff, 2002; Cann y Dickneider, 2004; Cann, 2009; Klingshirnf y Spessard, 2009; Karpudewan, Hj Ismail y Mohamed, 2011). Se argumenta que una de las barreras para implantar la química verde en la enseñanza experimental es la ausencia de métricas o la certificación (Matus et al., 2012). La evaluación del acercamiento verde de un experimento es un tema complejo, lo cual ha dado pauta para la propuesta de diferentes tipos de métricas, en particular las de carácter másico (Trost, 1991; Sheldon, 1992, 1994; Constable, Curzons y Cunningham, 2002; Domènech, Ayllón, Peral y Rieradevall, 2002; Glaser, 2009). Sin embargo, estas presentan limitaciones, ya que en lo general no consideran, en la evaluación, todos los principios de la química verde (Ribeiro y Machado, 2013a); inclusive otras solo se enfocan en la toxicidad y la seguridad. Recientemente han surgido métricas integrales u holísticas que consideran los 12 principios, pero suelen ser complejas en su empleo (Morales Galicia et al., 2011; Ribeiro y Machado, 2010, 2013b).

Considerando lo antes mencionado, en el presente trabajo se presenta una métrica integral para evaluar el acercamiento verde de un experimento de cualquier área de la química a partir de su correspondiente diagrama de flujo. En el diagrama se integran el tratamiento y la disposición de los residuos, y se consideran los riesgos a la salud, al ambiente y a la seguridad utilizando los pictogramas y rombos de seguridad de reactivos, sustancias auxiliares, productos y residuos.

Metodología

La métrica consiste en definir el diagrama de flujo del experimento, el balance de materia, la integración de los peligros a la salud y al ambiente, el peligro potencial de accidentes químicos de reactivos, productos y sustancias auxiliares en el diagrama, en los criterios para evaluar los 12 principios y en la elaboración de una carta de color para definir el correspondiente acercamiento verde del experimento.

Consideraciones para la evaluación de los 12 principios

Antes del trabajo experimental se requiere investigar y realizar las actividades que se describen a continuación:

- Para evaluar los principios 1, 2, 5 y 8 (P1, P2, P5 y P8) es necesario conocer todos los reactivos y sustancias auxiliares a utilizar, sus cantidades y/o concentraciones, transformaciones realizadas, productos, subproductos y residuos obtenidos en cada etapa del proceso.
- Evaluar el nivel de los riesgos a la salud, al ambiente y a la seguridad mediante los pictogramas y rombos de

seguridad de reactivos, sustancias auxiliares, productos y residuos: P3, P4 y P12.

- Investigar las condiciones de reacción de temperatura, presión y tiempo que deben mantenerse durante el desarrollo experimental, P6.
- Averiguar si las materias primas son renovables, P7, e investigar si los residuos y productos generados son biodegradables, P10.
- Conocer el uso de catalizadores en lugar de reactivos estequiométricos, P9.
- Finalmente es importante considerar el desarrollo de metodologías analíticas, P11 en esta métrica, ya que en muchos laboratorios de enseñanza experimental se aplica para el seguimiento de las reacciones o únicamente para adquirir la competencia de aplicar este principio en la evaluación del acercamiento verde de un experimento.

Construcción del diagrama de flujo

El diagrama de flujo debe elaborarse antes del trabajo experimental. Para realizarlo se sugiere utilizar los símbolos descritos en la tabla 1. Una vez generado este, deben incluirse las cantidades de reactivos, disolventes y reactivos auxiliares a utilizar. También es importante efectuar un balance de materia en cada etapa del experimento, incluyendo las transformaciones químicas, por lo que el análisis del proceso y las reacciones que se llevan a cabo deben estar indicados en el diagrama de flujo del proceso. Cabe resaltar que en la enseñanza experimental el producto, el subproducto, los disolventes y los residuos (aun los reutilizables) son considerados como residuos, y por ello deben incluirse dentro del diagrama como parte del proceso. En el diagrama debe considerarse el tratamiento y/o la disposición de residuos, así como los reactivos utilizados para el tratamiento de los residuos.

Criterios para evaluar los principios

Los criterios para evaluar el acercamiento verde de un experimento se presentan en la tabla 2. En los principios en donde se utilizan o generan sustancias (P3, P4, P5, P10, P8, P9, P10, P11 y P12) hay que evaluar los riesgos a la salud, al ambiente y el riesgo potencial de accidentes químicos, de acuerdo con lo establecido en cada principio.

Cuantificación de los principios uno y dos

Para evaluar P1 (prevención de residuos) es necesario determinar el factor de eficiencia (E) del experimento global, que se define como la cantidad, en kilogramos, de residuos generados durante la fabricación de un kilogramo de producto (Sheldon, 2003). Este factor se definió para procesos industriales. Sin embargo, en los laboratorios de enseñanza experimental, donde el objetivo se cumple durante la experimentación y no necesariamente en la cantidad de producto obtenido que, como se indicó previamente forma parte de los residuos, es necesario cuantificar todos los materiales utilizados en cada experimento. Así, el factor de eficiencia

Tabla 1 Simbología del diagrama de flujo


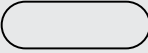


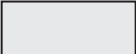


| Símbolo | Significado | Aplicación en los experimentos de laboratorio |
|---|------------------------|--|
|  | Inicio del proceso | Indica el inicio de un diagrama; de este solo puede salir una línea de flujo. Lleva el título general o de cada etapa del experimento |
|  | Final del proceso | Indica el final del experimento. El proceso terminará con el tratamiento y disposición de los residuos |
|  | Entrada general | Emplear únicamente para indicar los reactivos que entran al proceso, el volumen, el peso y la concentración |
|  | Salida general | Indica los materiales que salen del proceso (productos, residuos, etc.), su volumen, peso y concentración, así como los componentes y sus composiciones respectivas. Puede tener varias flechas de salida para indicar biodegradabilidad, reutilización, tratamiento y/o disposición de los residuos |
|  | Acción/proceso general | Contiene la instrucción general que el alumno debe realizar para el desarrollo del experimento y del tratamiento y disposición de los residuos. Si es posible debe indicar la transformación de los reactantes |
|  | Decisión | Sirve para comparar dos datos. Dependiendo del resultado (falso o verdadero) se toma la decisión de seguir un camino del diagrama u otro |
|  | Línea de flujo | Indica la dirección de flujo del proceso |

Tabla 2 Criterios para evaluar los principios de química verde en los experimentos de laboratorio

| N.º | Principios de la química verde | Criterio para evaluar cada principio |
|-----|--|---|
| P1 | Prevención de residuos | La eficiencia, eficiencia en masa o eficiencia en volumen debe ser mínima (microescala, semimicro). <i>Evaluar E_m o E_v</i> |
| P2 | Economía atómica | La economía atómica debe ser cercana al 100%. <i>Evaluar EA</i> |
| P3 | Usar metodologías que generen productos con toxicidad reducida | La metodología experimental debe utilizar y generar sustancias sin toxicidad. <i>Evaluar riesgos a la salud</i> |
| P4 | Generar productos eficaces pero no tóxicos | Los productos y/o residuos no deben ser tóxicos. <i>Evaluar riesgos a la salud</i> |
| P5 | Reducir el uso de sustancias auxiliares | No utilizar sustancias auxiliares; si se utilizan, no deben presentar riesgos para la salud y el ambiente. <i>Evaluar riesgos a la salud y al medio ambiente</i> |
| P6 | Disminuir el consumo energético | Los experimentos deben preferentemente llevarse a cabo a temperatura y presión ambientes |
| P7 | Utilizar materias primas renovables | La materia prima ha de ser preferiblemente renovable |
| P8 | Evitar derivados innecesarios | No utilizar derivados. <i>Evaluar riesgos a la salud y al ambiente</i> |
| P9 | Potenciar la catálisis | Evaluar en el siguiente orden: emplear catálisis heterogénea, catálisis homogénea, no es necesaria la catálisis. <i>Evaluar toxicidad del catalizador o sistema catalítico</i> |
| P10 | Generar productos biodegradables | Los productos químicos y/o residuos deben ser biodegradables. Si no es biodegradable, <i>evaluar toxicidad</i> al ambiente |
| P11 | Desarrollar metodologías analíticas para el seguimiento en tiempo real de los procesos | Utilizar metodologías fisicoquímicas para el seguimiento del experimento. Estas no deben presentar riesgos para la salud y el ambiente. <i>Evaluar riesgos a la salud y al ambiente</i> |
| P12 | Minimizar el potencial de accidentes químicos | Las sustancias utilizadas deben presentar el riesgo mínimo de accidentes químicos. <i>Evaluar riesgos de accidentes químicos</i> |

Para cumplir con los principios, el nivel de riesgo a la salud y de accidentes químicos debe ser uno o menor de uno.

en masa (E_m) se define como la masa, en gramos, de residuos generados por cada experimento realizado (ecuación 1):

$$E_m = \frac{\text{masa de residuos(g)}}{\text{exp erimento realizado}} \quad (1)$$

Como en muchos experimentos es más sencillo medir la cantidad de residuos que pesarlos, se define el factor de eficiencia en volumen (E_v) como el volumen, en mililitros, de

residuos obtenidos por cada experimento realizado (ecuación 2):

$$E_v = \frac{\text{volumen de residuos(ml)}}{\text{exp erimento realizado}} \quad (2)$$

P2 trata de economía atómica (EA), y originalmente fue definido en términos de la síntesis de productos. Sin embargo, en la enseñanza de la química se realizan experimentos de áreas diversas, por lo que P2 se evaluará haciendo

Tabla 3 Código de color en función del número de principios de la química verde que cumple el experimento

| N.º PQVCE | Color observado | Modelo de color RGB | Modelo de color CMYK |
|-----------|---|---------------------|---------------------------|
| 0 |  | 237, 28, 37 | 0.00, 0.882, 0.844, 0.071 |
| 1 |  | 240, 81, 35 | 0.00, 0.663, 0.854, 0.059 |
| 2 |  | 237, 110, 5 | 0.00, 0.54, 0.98, 0.07 |
| 3 |  | 243, 146, 0 | 0.00, 0.40, 1.00, 0.05 |
| 4 |  | 249, 179, 0 | 0.00, 0.28, 1.00, 0.02 |
| 5 |  | 255, 210, 0 | 0.00, 0.18, 1.00, 0.00 |
| 6 |  | 255, 237, 0 | 0.00, 0.07, 1.00, 0.00 |
| 7 |  | 239, 227, 0 | 0.00, 0.05, 1.00, 0.06 |
| 8 |  | 214, 217, 0 | 0.01, 0.00, 1.00, 0.15 |
| 9 |  | 187, 207, 0 | 0.10, 0.00, 1.00, 0.19 |
| 10 |  | 157, 196, 26 | 0.20, 0.00, 0.87, 0.23 |
| 11 |  | 122, 185, 41 | 0.34, 0.00, 0.78, 0.27 |
| 12 |  | 79, 174, 50 | 0.55, 0.00, 0.71, 0.32 |

N.º PQVCE: número de principios de la química verde que cumple el experimento.

un análisis en función del área experimental. El diseño de los experimentos que contienen reacciones químicas debe realizarse de tal manera que se incorporen al máximo todos los reactivos en el producto final o en su defecto que procedan al máximo rendimiento, con el fin de obtener menor número de componentes en los residuos. Esto permitirá tener metodologías donde el tratamiento y/o la disposición de los residuos resulten más sencillos (siempre y cuando sea técnica y económicamente viable), y entonces se podrá evaluar la EA.

Diseño de la carta de colores para el proceso

La carta de colores cuenta con trece matices (tabla 3); en ella se integraron los colores del semáforo (rojo, amarillo y verde), intercalando cinco matices intermedios entre el rojo y el amarillo y cinco entre el amarillo y el verde. Para facilitar a los profesores y alumnos la identificación correcta del color al realizar la carta en archivo digital se presentan los códigos de color en el modelo RGB (por las siglas en inglés de *red, green, blue* [rojo, verde, azul]), y para no generar confusiones en el color impreso se presentan los códigos de acuerdo al modelo CMYK (por las siglas en inglés para *cyan, magenta, yellow, black or key* [cian, magenta, amarillo, negro]). Cada color indica el número de principios de la química verde que cumple el experimento (PQVCE) o cierta etapa del proceso. Por ejemplo, el color rojo (RGB: 237, 28, 37) indica que no se cumple ningún principio de la química verde, mientras que el amarillo (RGB: 255, 237, 0) indica que el experimento cumple con seis principios.

Para llevar a la práctica el empleo de un diagrama de flujo como semáforo de seguridad ecológica se analizaron dos

experimentos de adsorción diseñados en nuestros laboratorios: la adsorción de azul de metileno sobre una bentonita (Vargas-Rodríguez y Obaya, 2011) y la adsorción de antocianinas de jugo de arándano sobre bentonita (Hernández, 2013).

Resultados y discusión

En la figura 1 se muestran los diagramas de flujo para ambos experimentos; las metodologías se pueden observar directamente en ellos. En los símbolos del diagrama se integraron los peligros para la salud, el ambiente y el peligro potencial de accidentes químicos de reactivos, productos y sustancias auxiliares utilizando los pictogramas y rombos de seguridad.

Posteriormente se evaluó el cumplimiento de principios de la química verde para cada experimento (tabla 4). Los materiales utilizados en el primer experimento de adsorción son bentonita y azul de metileno. Ambos presentan riesgo a la salud de uno, por lo que se consideran de bajo riesgo, ambos son no renovables (P7), el azul de metileno no es biodegradable y presenta riesgos para el ambiente (P10). Así pues, este experimento únicamente cumple con diez principios de la química verde, y de acuerdo con la carta de color los símbolos del diagrama presentan de fondo el color con código RGB: 157, 196, 26.

En el segundo experimento se cambió el azul de metileno por antocianinas de jugo de arándano, que son renovables, biodegradables y no presentan riesgos para la salud ni el medio ambiente; por lo tanto, cumple con los doce principios. Entonces al diagrama de flujo ecológico le corresponde el color con código RGB: 79, 174, 50.

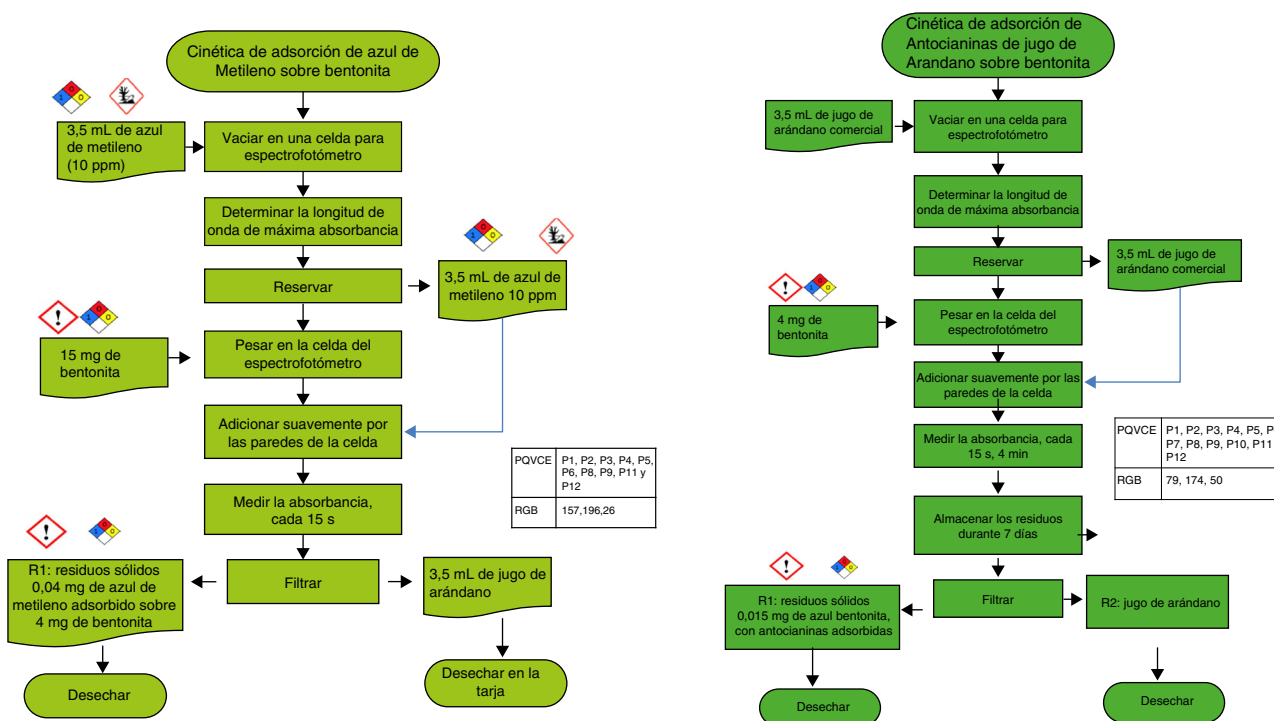


Figura 1 Diagramas de flujo ecológico de los experimentos de cinética de adsorción de azul de metileno y antocianinas de jugo de arándano sobre bentonita.

Tabla 4 Evaluación del acercamiento verde de los experimentos de adsorción

| N.º Principio | Observación en el experimento de adsorción de azul de metileno | Cumple | Observación en el experimento de adsorción de antocianinas | Cumple |
|---------------|---|--------|--|--------|
| P1 | $E_m = 4.004$, el factor de eficiencia es mínimo | ✓ | $E_m = 4.015$, el factor de eficiencia es mínimo | ✓ |
| P2 | El fenómeno de adsorción a tiempo infinito (168 h) se lleva a cabo al 100%, por lo tanto el líquido es agua y el sólido es azul de metileno/bentonita | ✓ | El fenómeno de adsorción a tiempo infinito (168 h) se lleva a cabo al 100%, por lo tanto el líquido es agua y el sólido contiene colorantes del jugo de arándano/bentonita | ✓ |
| P3 | El experimento es eficaz y la metodología seleccionada presenta toxicidad reducida (1 en riesgo a la salud) | ✓ | El experimento es eficaz y la metodología seleccionada, presenta toxicidad reducida (uno en riesgo a la salud) | ✓ |
| P4 | Residuos de toxicidad reducida (1 en riesgo a la salud y riesgo al medio ambiente) | ✓ | Residuos de toxicidad reducida (uno en riesgo a la salud) | ✓ |
| P5 | El avance de la reacción se realizó por métodos fisicoquímicos, eliminando el uso de sustancias auxiliares | ✓ | El avance de la reacción se realizó por métodos fisicoquímicos, eliminando el uso de sustancias auxiliares | ✓ |
| P6 | El experimento se desarrolla a temperatura y presión ambientes minimizando el consumo energético | ✓ | El experimento se desarrolla a temperatura y presión ambientes minimizando el consumo energético | ✓ |
| P7 | El azul de metileno es no renovable | X | El arándano es renovable | ✓ |
| P8 | No fue necesaria la formación de grupos de bloqueo | ✓ | No fue necesaria la formación de grupos de bloqueo | ✓ |
| P9 | No es necesario el uso de catalizador. No aplica este principio | ✓ | No es necesario el uso de catalizador. No aplica este principio | ✓ |
| P10 | La bentonita es ecoamigable pero el azul de metileno no es biodegradable. Además, el AM presenta riesgo para el medio ambiente | X | La bentonita es ecoamigable y el jugo de arándano es biodegradable | ✓ |
| P11 | El seguimiento del proceso se realiza en tiempo real por métodos fisicoquímicos | ✓ | El seguimiento del proceso se realiza en tiempo real por métodos fisicoquímicos | ✓ |
| P12 | Los materiales no presentan riesgos de accidentes químicos | ✓ | Los materiales no presentan riesgos de accidentes químicos | ✓ |

✓: cumple el principio; X: no cumple el principio.

Conclusiones

Se presenta una nueva métrica integral de química verde para evaluar el acercamiento verde de experimentos de laboratorio. Esta métrica puede utilizarse para analizar experimentos aun sin llevarlos a cabo. El diagrama final resulta en un instrumento visual, análogo a un semáforo, que indica que tan cerca está el experimento de cumplir con todos los principios de la química verde. Este nuevo método es adecuado para el análisis, diseño de experimentos y/o adecuación de experimentos clásicos de la literatura, en el contexto de la química verde.

Financiación

Esta investigación fue realizada con fondos del proyecto DGAPA-UNAM PAPIIME PE102111.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Agradecimientos

Agradecemos a Jaime Pérez-Huerta por su asistencia técnica.

Referencias

- Anastas, P. T. y Kirchoff, M. M. (2002). *Origins, current status and future challenges of Green Chemistry. Accounts of Chemical Research*, 35(9), 686–694.
- Anastas, P. T. y Warner, J. C. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*. New York, NY: Oxford University Press.
- Cann, M. C. y Dickneider, T. A. (2004). *Infusing the chemistry curriculum with Green Chemistry using real-world examples, web modules, and atom economy in Organic Chemistry course. Journal of Chemistry Education*, 81(7), 977–980.
- Cann, M. C. (2009). *Greening the chemistry lecture curriculum: Now is the time to infuse existing mainstream textbooks with Green Chemistry*. En P. T. Anastas, I. J. Levy, y K. E. Parent (Eds.), *Green Chemistry Education: Changing the Course of Chemistry* (pp. 93–102). Washington DC: ACS Symposium Series 1011, American Chemical Society.

- Constable, D. J. C., Curzons, A. D. y Cunningham, V. L. (2002). Metrics to 'green' chemistry-which are the best? *Green Chemistry*, 4, 521-527.
- Domènech, X., Ayllón, J., Peral, J. y Rieradevall, J. (2002). How green is a chemical reaction? Application of LCA to Green Chemistry. *Environmental Science and Technology*, 36(24), 5517-5520.
- Glaser, J. A. (2009). Green Chemistry metrics. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 11, 371-374.
- Hernández, A. (2013). *El diagrama de flujo como semáforo de seguridad ecológica en los experimentos de laboratorio de cinética y catálisis [tesis de Licenciatura]*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hjerensen, D. L., Boese, J. M. y Schutt, D. L. (2000). Green Chemistry and education. *Journal of Chemistry Education*, 77(12), 1444-1543.
- Karpudewan, M., Hj Ismail, Z. y Mohamed, N. (2011). Green Chemistry: Educating prospective science teachers in education for sustainable development at school of educational studies. *USM Journal of Social Sciences*, 7(1), 42-50.
- Kirchhoff, M. M. (2001). Topics in Green Chemistry. *Journal of Chemistry Education*, 78(12), 1577.
- Kirchhoff, M. M. (2005). ACS NEWS: Green Chemistry school is international draw. *Chemical & Engineering News Archive*, 83(34), 50.
- Kirchhoff, M. M. (2007). Green Chemistry south of the border. *Chemical & Engineering News Archive*, 85(3), 40.
- Kirchhoff, M. M. (2009). Green Chemistry Education: Toward a Greener Day. En P. T. Anastas, I. J. Levy, y K. E. Parent (Eds.), *Green Chemistry Education: Changing the Course of Chemistry* (pp. 187-194). Washington DC: ACS Symposium Series 1011, American Chemical Society.
- Klingshirnf, M. A. y Spessard, G. O. (2009). Integrating Green Chemistry into the Introductory Chemistry Curriculum. En P. T. Anastas, I. J. Levy, y K. E. Parent (Eds.), *Green Chemistry Education: Changing the Course of Chemistry* (pp. 79-92). Washington DC: ACS Symposium Series 1011, American Chemical Society.
- Matus, K. J., Clark, W. C., Anastas, P. T. y Zimmerman, J. B. (2012). Barriers to the implementation of green chemistry in the United States. *Environ Sci Technol*, 46, 10892-10899.
- Morales Galicia, M., Martínez, J., Reyes-Sánchez, L., Martín Hernández, O., Arroyo Razo, G., Obaya Valdivia, A. y Miranda Ruvalcaba, R. (2011). ¿Qué tan verde es un experimento? *Educación Química*, 22(3), 240-248.
- Ribeiro, G. y Machado, A. (2010). 'Green Star': A holistic Green Chemistry metric for evaluation of teaching laboratory experiments. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 3(2), 149-159.
- Ribeiro, G. y Machado, A. (2013a). Holistic metrics for assessment of the greenness of chemical reactions in the context of Chemical Education. *Journal of Chemical Education*, 90, 432-439.
- Ribeiro, G. y Machado, A. (2013b). Greenness of chemical reactions—limitations of mass metrics. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 6(1), 1-18.
- Sheldon, R. A. (1992). Organic synthesis — past present and future. *Chemistry and Industry (London)*, 903-906.
- Sheldon, R. A. (1994). Consider the environmental quotient. *CHEM-TECH*, 38-47.
- Sheldon, R. A. (2003). Atom utilization, E factors and the catalytic solution. *C. R. Academic Science*, 3, 541-551.
- Trost, B. M. (1991). The atom economy — a search for synthetic efficiency. *Science*, 254, 1471-1477.
- Vargas-Rodríguez Y.M., Obaya A., Experimentos de Cinética y Catálisis Verde. *Química Verde Experimental* 27-34. FES-Cuautitlán UNAM, México, 2011.